

TIPIKAL KUANTITAS INFILTRASI MENURUT KARAKTERISTIK LAHAN (KAJIAN EMPIRIK DI DAS CIMANUK BAGIAN HULU)

Dede Rohmat dan Iwan Setiawan

¹Jurusan Pendidikan Geografi FPIPS UPI

Jln. Dr. Setiabudhi No 229 Bandung 40154.

E-mail: rohmat_dede@yahoo.com atau iwan4671@gmail.com

ABSTRAK

Laju infiltrasi merupakan fungsi dari parameter hidraulik tanah, yaitu; permeabilitas, *suction head*; dan kelembaban tanah. Parameter-parameter tersebut mempunyai hubungan erat dengan karakteristik fisik tanah dan dapat diformulasikan melalui penelitian empirik. Sehubungan dengan hal tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh kuantitas infiltrasi tipikal berdasarkan karakteristik lahan melalui kajian lapangan (empirik). Metode infiltrasi Green-Ampt dikembangkan dan digunakan untuk mengkaji kapasitas infiltrasi tipikal di Daerah Aliran Sungai Bagian Hulu (Kasus DAS Cimanuk Hulu). Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan empirik-analitik. Penelitian dilakukan pada tanah oxisol yang digunakan oleh lima macam penggunaan lahan. Sebanyak 96 sampel tanah diambil dari 16 titik pengamatan. Sekitar 12 parameter sifat fisik tanah dianalisis untuk setiap sampel tanah. Kajian mencakup pengembangan tipikal kapasitas infiltrasi berdasarkan data empirik pada aneka macam penggunaan lahan (hutan; agroforestri; palawija; permukiman; dan lahan tidak digarap). Intensitas hujan diformulasikan sebagai fungsi dari lama hujan dan probabilitas hujan $I=f(t,p)$. Parameter K diformulasikan sebagai fungsi dari kandungan air; pori drainase cepat, dan pori drainase lambat ($K = f(\theta, \eta_c, \eta_l)$). Parameter suction head (ψ), diformulasi sebagai fungsi dari kelembaban tanah ($\psi=f(\theta)$). Parameter $F(t)_{dummy}$, diformulasi sebagai fungsi dari lama hujan (t) dan probabilitas hujan (p); ($F(t)_{dummy}=f(t,p)$). Sehingga berdasarkan data empirik, laju infiltrasi ($f(t)$) Green Ampt dikembangkan sebagai $f(t) = f(\theta, \eta_c, \eta_l, t, p)$; dan infiltrasi kumulatif dihitung oleh $F(f) = f(t)$. t. Infiltrasi setiap macam tutupan lahan mempunyai pola yang hampir sama, namun berbeda dalam kuantitasnya.

Kata Kunci: Tipikal infiltrasi; infiltrasi, permeabilitas; fisik tanah; *suction head*, DAS (Daerah Aliran Sungai)

TYPICAL OF INFILTRATION QUANTITY ON LAND CHARACTERISTICS BASED (EMPIRICAL STUDY ON CIMANUK UPPER CATCHMENT)

ABSTRACT

The rate of infiltration, as Green–Ampt proposed, is a function of soil hydraulic parameters, that is permeability, suction head and soil moisture. Those parameters have close relationship with soil physical characteristics. The relation between the two soil characteristics can be formulated by empirical research. In this case, the aim of this study is to get typical infiltrate quantity based on land characteristics through field study(empirical). Green-Ampt infiltration method has developed and can be applied to study typical infiltration capacity on Upstream of Watershed (Case on Upstream Cimanuk Watershed). Research was used empirical and analytical approach. The study was conducted at Oxisol Soil occupied by five kinds of land use. There are 96 soil samples were gathered, taken away from 16 observation points. About 12 parameters of soil physical properties were analyzed to each soil sample. The study covers the development of typical infiltration capacity based on empirical data at multivarious land use characteristics (forest; agro forestry; second crops (palawija); settlement; and non arable land). The precipitation intensity has been formulated as function of rain duration and its probabilities. K formulated as a function of volumetric water content; rapid drainage pores, and slow drainage pores ($K=f(\theta, \eta_c, \eta_l)$). Parameter of suction head (ψ), formulated as function of soil moisture ($\psi=f(\theta)$). Parameter of $F(T)_{dummy}$, formulated as function of p and t ; ($F(T)_{Dummy}=F(t,p)$). So, according to empirical data, the rate of infiltration $f(t)$ of Green Ampt infiltration rate has been developed as $f(t) = f(\theta, \eta_c, \eta_l, t, p)$; and cumulative infiltration can be calculated by $F(F = f(t), t)$. The Infiltration of every kinds of land characteristics have close resemblance, but may vary in its quantity.

Keywords: Infiltrate typical; infiltrate, hydraulic conductivity; soil physis; suction head, watershed

PENDAHULUAN

Pembentukan dan perluasan lahan kritis sangat berkaitan dengan proses erosi. Di Daerah Aliran Sungai (DAS) bagian hulu, faktor aliran permukaan (*surface run off*) merupakan faktor utama penyebab erosi. Tingkat kerusakan lahan akibat erosi sangat ditentukan oleh besar kecilnya aliran permukaan, sedangkan aliran permukaan sangat dipengaruhi oleh curah hujan, infiltrasi, intersepsi, evapotranspirasi, dan *storage*.

Jika evapotranspirasi selama kejadian hujan diasumsikan sama dengan nol; intersepsi dan *storage* diasumsikan mempunyai batas optimum yang akan dicapai oleh besar hujan tertentu, maka aliran permukaan merupakan fungsi dari infiltrasi. Infiltrasi sangat bergantung atas sifat fisik dan hidraulik kolom tanah, penggunaan lahan, kondisi permukaan tanah, dan faktor eksternal hujan (Rohmat, 2004).

Metode infiltrasi Green-Ampt merupakan metode pendugaan kapasitas dan laju infiltrasi. Metode ini metoda lama, namun hingga sekarang masih tetap digunakan karena hasil pendugaannya tidak lebih buruk dari hasil pendugaan metode-metode pendugaan infiltrasi yang lebih baru (Miyazaki, 1993). Selain itu, metode Green-Ampt menarik banyak perhatian, karena metodenya simpel, didasarkan atas karakteristik fisik, dan parameternya dapat diukur (Jia, 1998).

Laju infiltrasi menurut Green-Ampt (1911), merupakan fungsi dari parameter hidraulik tanah, yaitu; permeabilitas, *suction head*; dan kelembaban tanah. Parameter-parameter tersebut mempunyai hubungan erat dengan karakteristik fisik tanah. Hubungan antara dua karakteristik tanah tersebut, dapat diformulasikan melalui penelitian empirik.

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kuantitas infiltrasi tipikal berdasarkan karakteritik lahan melalui kajian lapangan (empirik).

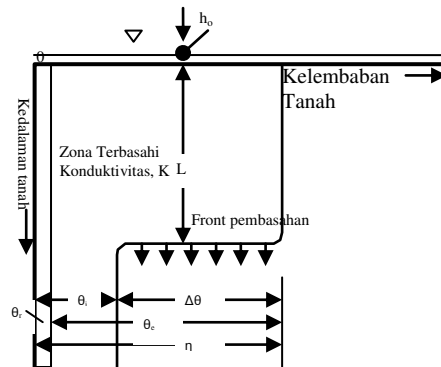
BAHAN DAN METODE

Dasar Teoritik: Metode Green-Ampt

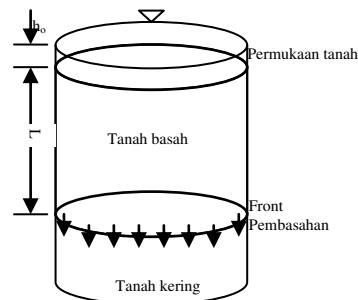
Green dan Ampt mengembangkan pendekatan *Teori Fisik* yang dapat diselesaikan dengan *Penyelesaian Analitik Exact* (*Exact Analytical Solution*) untuk menentukan infiltrasi (Chow, 1988). Infiltrasi adalah penetrasi air dari permukaan ke dalam tanah secara vertical.

Dalam Pendekatan ini Green Ampt mengemukakan istilah *Front Pembasahan*, yaitu suatu batas yang jelas antara tanah yang mempunyai kelembaban tertentu (θ) di bawah dengan tanah jenuh (η) di atasnya. *Front pembasahan* ini terdapat pada kedalaman L yang dicapai pada waktu t dari permukaan (Gambar. 1).

Dalam pendekatan ini kontrol volume kolom tanah digunakan sebagai satuan analisis. Kontrol volume merupakan satuan analisis yang dibatasi oleh luas permukaan dan kedalaman L . Air yang masuk ke dalam akan menyebabkan pertambahan kelembaban tanah dari kelembaban (awal) θ pada kedalaman L , maksimum menjadi η (porositas).



Gambar 1. Zonasi kelembaban tanah akibat infiltrasi (Chow, 1989)



Gambar 2. Infiltrasi kolom tanah (Chow, 1989)

Pertambahan air sebagai hasil infiltrasi untuk suatu unit volume adalah $L(\eta - \theta)$ atau sama dengan infiltrasi kumulatif (F) (Gambar. 2):

$$F = L(\eta - \theta) = L \Delta \theta \quad (1)$$

Hukum Darcy's menyajikan persamaan momentum untuk suatu *flux*, yaitu :

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2)$$

Nilai q (Darcy flux) untuk seluruh kedalaman adalah konstan; didekati oleh $-f$:

$$q = K \frac{(h_1 - h_2)}{(z_1 - z_2)} \quad (3)$$

Jika Ψ adalah *suction head* tanah untuk *wetting front*; h_1 adalah *head* permukaan sama dengan kedalaman genangan (h_0), dan h_2 adalah *head* tanah yang kering di bawah *wetting front*. *Head* (h) adalah penjumlahan *suction head* (Ψ) dan *gravity head* (z), maka :

$$h_2 = -\Psi - L.$$

Hukum Darcy untuk sistem ini adalah :

$$f = K \left[\frac{h_o - (-\psi - L)}{L} \right]$$

$$f \approx K \left[\frac{\psi + L}{L} \right] \quad (4)$$

Persamaan di atas untuk asumsi bahwa genangan permukaan h_o dapat diabaikan dibandingkan dengan Ψ dan L . Jika h_o tidak diabaikan; dapat disumsikan bahwa $h_o=0$. Persamaan (5), disubstitusikan ke dalam persamaan (4) :

$$L = \frac{F}{\Delta\theta} \quad (5)$$

didapat :

$$f = K \left[\frac{\psi\Delta\theta + F}{F} \right] \quad (6)$$

Pada saat $f = dF/dt$, persamaan (6), merupakan persamaan untuk menyatakan tingkat infiltrasi potensial (1). Persamaan (6) dapat diekspresikan sebagai persamaan diferensial dalam (F) yang tidak diketahui :

$$\frac{dF}{dt} = K \left[\frac{\psi\Delta\theta + F}{F} \right] \quad (7)$$

sehingga diperoleh integrasinya :

$$F(t) = \Psi\Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta} \right) + Kt \quad (8)$$

dengan

$F(t)$ = infiltrasi kumulatif

Ψ = suction head

$\Delta\theta$ = selisih antara porositas (η) dengan kandungan air awal (θ)

K = permeabilitas tanah

Persamaan (8), merupakan persamaan Green-Ampt; untuk menghitung infiltrasi kumulatif F potensial, sedangkan tingkat infiltrasi didapat dari

$$f(t) = K \left[\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1 \right] \quad (9)$$

Bahan dan Alat

Penelitian ini bersifat pengamatan fisik-analitik terhadap sifat fisik tanah. Bahan yang digunakan antara lain plastik sampel untuk pengambilan sampel tanah tak terganggu dan alat tulis untuk menandai sampel tanah. Sedangkan peralatan yang digunakan antara lain hand bor tanah (pengambilan sampel tanah terganggu), ring sample (sampel tanah tidak terganggu), oven tanah dan timbangan elektrik (kandungan air tanah).

Pengumpulan dan Analisis Data

Penelitian menggunakan metode observasi lapangan, dengan pendekatan empirik-analitik. Pengamatan lapangan dilakukan dalam kurun waktu 4 bulan, mulai bulan Januari 2001 hingga April 2001.

Rekaman hujan otomatis selama 3 tahun diidentifikasi untuk memperoleh data ketebalan

hujan, ($R(t)$), durasi hujan (t) dan intensitas hujan setiap kejadian hujan. Data ini digunakan untuk formulasi pola hujan daerah penelitian.

Sampel tanah diambil dari 16 titik pengamatan, representatif pada setiap penggunaan lahan (palawija, 5 titik pengamatan; *Agroforestry*, 4 titik pengamatan; *non arable land*, 2 titik sampel; hutan, 2 titik sampel; dan permukiman, 3 titik sampel). Sampel tanah yang diambil adalah *disturbed soil samples* dan *undisturbed soil samples*. Dua belas buah sampel tanah (6 sampel terganggu dan 6 sampel tidak terganggu), diambil dari setiap titik pengamatan, masing-masing mewakili kedalaman 0-20 cm; 20-40 cm; 40-60 cm; 60-80 cm; 80-100 cm; dan 100-120 cm. Pengamatan dilakukan satu kali pada awal penelitian.

Analisis laboratorium, dilakukan terhadap sampel tanah terganggu untuk mendapatkan nilai variabel *coarse sand* (s_c ; %); *fine sand* (s_f ; %); *silt* (s_i ; %); *clay* (c_i ; %); dan *organic matter* (o_m ; %). Sampel tanah tidak terganggu dianalisis untuk mendapatkan nilai variabel *total porosity* (η ; %); *rapid drainage pores* (η_c ; %); *slow drainage pores* (η_i ; %); *bulk density* (ρ_b ; g/cm^3); *particle density* (ρ_p ; g/cm^3); *suction head* (ψ ; cm); *potential free energy* (pF); *volumetric water content* (θ ; %) (5); *permeability* (K ; cm/jam).

Pengamatan hujan selama kurun waktu penelitian (4 bulan), dilakukan secara otomatis dengan alat yang mampu mengukur waktu hujan, lama hujan dan ketebalan hujan. Pada kurun ini, infiltrasi kumulatif akibat hujan, diukur dari perbedaan kelembaban sampel tanah yang diambil sebelum hujan dan sesudah hujan. Pengambilan sampel tanah dilakukan pada interval kedalaman 20 cm, mulai permukaan tanah hingga kedalaman 120 cm. Kelembaban diukur melalui pengovenan pada suhu 105°C selama 10 jam.

HASIL DAN PEMBAHASAN

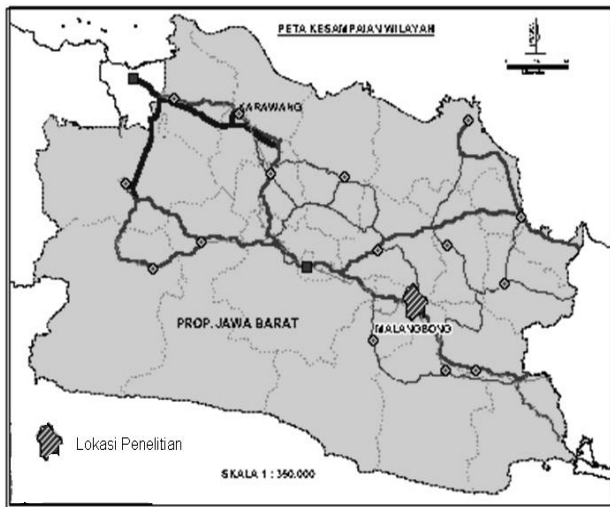
Karakteristik Fisik Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Kecamatan Malangbong Kabupaten Garut Propinsi Jawa Barat, Indonesia (108°14' 08"BT-108°16' BT dan 06°54' 44"LS-07°01' 36"LS). Sekitar 7 jam perjalanan darat dari Ibu kota Indonesia, Jakarta atau 2 jam dari ibu kota propinsi Jawa Barat, Bandung (Gambar 3).

Lokasi penelitian terletak pada ketinggian 560-800 meter di atas permukaan laut (m dpl). Kemiringan lereng berkisar antara 15- >40%. Rata-rata hujan tahunan wilayah *Cekungan Kecil* Cikumutuk sekitar 2.676 mm per tahun.

Secara geologi, batuan daerah penelitian merupakan hasil erupsi gunung api tua yang

diperkirakan terjadi pada zaman plio-plestosen, terdiri dari perselingan breksi, lava, tufa dan lahar bersusunan andesit sampai basal.



Gambar 3. Lokasi penelitian

Menurut Sistem Taxonomy, tanah di lokasi termasuk *Great Group Oxorthox*; *Haplorthox*; *Rodorthox*; dan *Chromorthox* (USDA, 1995) atau Latosol oksic; Latosol haplik; Latosol rodik; dan Latosol kromik (Darmawidjaja, 1990). Tanah-tanah ini mempunyai tekstur *clay loam* di permukaan dan *clay* di bawah permukaan.

Lima macam penggunaan lahan ditemukan di atas tanah tersebut yaitu palawija (second crops); agroforestri (agroforestry); lahan tidak digarap (*non arable land*), hutan atau kayui campuran (forest or mix timbres); dan permukiman (settlement).

Palawija merupakan budidaya lahan kering dengan dominasi tanaman semusim; sedang tanaman tahunan difungsikan sebagai tanaman pelindung atau tanaman batas lahan. Jenis tanaman yang dikembangkan pada lahan ini antara lain jagung, kacang tanah, ubi jalar, padi gogo, singkong, jahe, dan cabe keriting. Palawija tersebar pada tanah *Chromorthox*, *Haplorthox*, dan *Oxthorthox*.

Pengolahan tanah dan pemakaian van organik intensif. Seluruh lahan telah berteras, kemiringan lahan dianggap sama dengan nol. Secara kualitatif, penutupan lahan oleh tajuk tanaman bervariasi dari 50% sampai 90%.

Agroforestry, terdiri atas hutan rakyat dan sistem tumpang sari. Sistem hutan rakyat, adalah sistem pemanfaatan lahan dengan tanaman tahunan (100%). Dominasi tanaman berupa Albazia dari jenis Sengon dan Sengon Buto, dengan jarak tanam masing-masing sekitar 2 x 3 meter dan 5 x 5 meter. Penutupan lahan mencapai 80-100%. Pada sistem

tumpang sari, tanaman tahunan yang ditemukan adalah cengkih dan sengon, dengan jarak tanam sekitar 10 x 10 meter. Tanaman semusim yang tumbuh di antara tanaman cengkih adalah cabe, sedangkan di antara tanaman sengon adalah jagung dan singkong. Penutupan lahan pada ini sekitar 70%.

Penggunaan lahan agroforestri tersebar pada tanah *Chromorthox*, *Haplorthox*, *Oxthorthox*, dan *Rhodorthox*. Lahan umumnya berteras, sehingga kemiringan lereng dianggap sama dengan nol.

Lahan yang tidak digarap, tersebar pada tanah *Haplorthox*, dan *Rhodorthox*. Tumbuhan dominan adalah semak dari alang-alang dengan penutupan lahan 100%.

Hutan (Kayu Campuran), merupakan lahan yang didominasi tanaman tahunan dari jenis kayu-kayuan dan difungsikan sebagai hutan lindung. Di bawah tegakan tumbuh tanaman perdu, semak, dan rumput liar. Dengan demikian, lahan tertutup rapat oleh tajuk tanaman (100%). Areal ini menempati tanah *Haplorthox* dan *Chromorthox*, dengan kemiringan dianggap sama dengan nol.

Permukiman di lokasi penelitian merupakan permukiman khas upland; berteras, terdapat (tampungan) storage di permukaan lahan, tidak mempunyai saluran drainase khusus, dan mempunyai halaman bermain dan budidaya tanaman pekarangan. Penutupan lahan di areal permukiman sekitar 30–40%. Tanah yang ditempati untuk permukiman adalah tanah *Haplorthox*, *Oxthorthox*, dan *Rhodorthox*.

Sintesis dan Pola Intensitas Hujan

Pola intensitas hujan diformulasi guna memperoleh pola intensitas hujan yang sesuai dengan wilayah penelitian dan sebagai masukan untuk pengembangan metode pendugaan infiltrasi empirik. Pola intensitas hujan disajikan dalam bentuk persamaan yang menyatakan intensitas hujan (I ; mm/jam) sebagai fungsi dari durasi hujan (t ; jam) dan probabilitas (%), atau $I = f(t, p)$. Formulasi dilakukan berdasarkan 162 data kejadian hujan yang direkam selama kurun 3 tahun.

Formulasi pola intensitas hujan dilakukan melalui proses :

- (i) Pengelompokan data hujan menurut durasi hujan ($t = 0,25; 0,5; 1; 2; 3$; dan 6 jam)
- (ii) Transformasi logaritmik data, agar diperoleh data intensitas hujan yang mempunyai sebaran normal.
- (iii) Perhitungan probabilitas hujan (p ; %).
- (iv) Menghitung pola hubungan antara I dengan p pada setiap kelompok durasi hujan. Hubungan tersebut berbentuk :

$$I_{0,25} = 10^{(-0,0163.p + 1,6345)} \quad (10)$$

$$I_{0,5} = 10^{(-0,0163.p + 1,4060)} \quad (11)$$

$$I_1 = 10^{(-0,0163.p + 1,1770)} \quad (12)$$

$$I_2 = 10^{(-0,0163.p + 1,0760)} \quad (13)$$

$$I_3 = 10^{(-0,0163.p + 0,9823)} \quad (14)$$

$$I_6 = 10^{(-0,0163.p + 0,8950)} \quad (15)$$

- (v) Menentukan intensitas hujan berdasarkan sembarang nilai probabilitas untuk setiap kelompok durasi hujan.
- (vi) Menentukan pola hubungan antara intensitas hujan dengan durasi dan probabilitas hujan, atau $I=f(t,p)$. Pola hubungan tersebut berbentuk :

$$I = 6,61e^{-0,0375p} + 9,16e^{-0,0375p} \frac{1}{t} \quad (16)$$

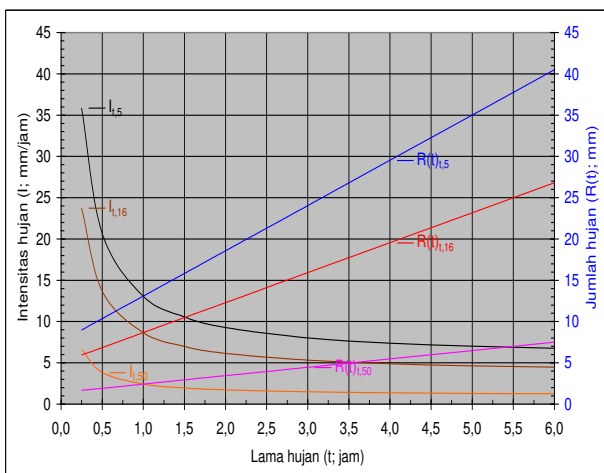
Persamaan akhir pola intensitas hujan yang sesuai untuk areal penelitian adalah :

$$I_{t,p} = \left(\frac{9,16 + 6,61t}{t} \right) e^{-k} \quad (17)$$

dengan, I adalah intensitas hujan (mm/jam); t adalah durasi hujan (jam); $e = 2,718$; $k=0,0375$. p ; dan p adalah probabilitas (%). Ketebalan hujan selama kejadian hujan ($R(t)_{t,p}$) dihitung oleh :

$$R(t)_{t,p} = I_{t,p} \cdot t \quad (18)$$

Dengan persamaan (17) dan (18) dihitung intensitas dan ketebalan hujan untuk $t = 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5$; dan 6 jam, dalam kelompok probabilitas (p) kejadian hujan 50% ; 16% ; dan 5% . Nilai probabilitas 50% adalah nilai rata-rata; probabilitas 16% , adalah nilai rata-rata ditambah standar deviasi; dan probabilitas 5% adalah nilai ekstrim (Gambar. 5).



Gambar 5. Intensitas dan ketebalan hujan pada t dan p

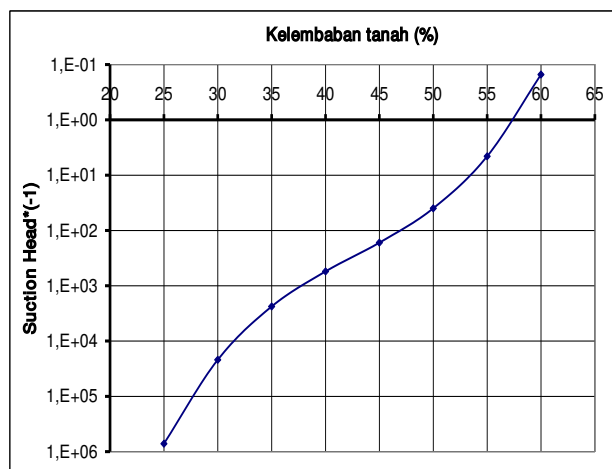
Pendugaan Suction Head Berdasarkan Kelembaban Tanah

Suction head (ψ) adalah nilai yang menyatakan energi hisapan tanah terhadap air di dalam pori atau sekitar butir tanah (*soil water*) (Laat, 1987).

$$\psi = -(10^{pF}) \quad (19)$$

dengan pF adalah nilai *potential free energy* tanah yang besarnya sangat bergantung pada kandungan air tanah. Dari 96 buah sampel tanah, diperoleh hubungan antara kandungan air tanah (θ) dengan nilai pF , yaitu (Gambar 6) :

$$pF = 29,30 - 1,684\theta + 0,0371\theta^2 - 0,00029\theta^3$$



Gambar 6. Suction head versus kelembaban tanah

Pendugaan Nilai Permeabilitas Berdasarkan Sifat Fisik Tanah

Permeabilitas menyatakan kemampuan media porus (tanah) untuk meloloskan zat cair (air hujan) baik secara lateral maupun vertical (cm/jam). Hubungan antara permeabilitas dengan sifat fisik tanah (12 variabel, masing-masing merupakan rata-rata dari 96 buah data) dilakukan dengan analisis regresi linier berganda - metode *Backward*.

Agar data K tersebar secara normal, data K ditransformasi menjadi $\ln K$. Hasil akhir analisis menunjukkan bahwa terdapat tiga variabel sifat fisik tanah yang mempunyai efek signifikan terhadap permeabilitas tanah ($\ln K$), yaitu kelembaban tanah (θ); kandungan pori drainase cepat (η_c); dan kandungan pori drainase lambat (η_l). Sehingga pendugaan permeabilitas (K) dilakukan oleh :

$$K = e^{-2,391 - 0,090\theta + 0,161\eta_c + 0,845\eta_l} \quad (20)$$

Pengembangan Persamaan Tipikal Kuantitas Infiltrasi

Berdasarkan persamaan (19) dan (20), persamaan infiltrasi (9) dikembangkan menjadi :

$$f(t) = 10.e^a \left[\frac{\mu}{\chi_{Cr}} + 1 \right] \quad (21)$$

dengan : $f(t)$ adalah laju infiltrasi (mm/jam); e^a adalah Permeabilitas tanah (cm/jam); $a = -2,391 - 0,090.\theta + 0,161.\eta_c + 0,845.\eta_l$; $\mu = [- (10^{pF} \cdot \Delta\theta)]$; $\Delta\theta = \eta - \theta$; dan χ_{Cr} adalah infiltrasi kumulatif dummy yang harus dicari formulanya (cm); sedangkan Cr adalah W (palawija); A (agroforrestri); N (tidak digarap); H (kayu campuran/hutan); (P) permukiman.

Parameter χ_{Cr} dicari dengan pengubahan bentuk persamaan (21) menjadi :

$$\chi_{Cr} = \frac{e^a(\mu)}{f(t) - e^a} = \frac{e^a(-10^{pF})(\Delta\theta)}{f(t) - e^a} \quad (22)$$

Parameter $f(t)$ pada persamaan (22), diperoleh dari pembagian infiltrasi kumulatif empirik pada lima macam penggunaan lahan oleh lama hujannya, atau :

$$f(t) = \frac{F(t)_{Cr}}{t} \quad (23)$$

Berdasarkan hasil pengamatan, nilai parameter $F(t)_{Cr}$ mengikuti persamaan :

$$F(t)_{Cr} = 10^{K_{Cr}} - 1 \quad (24)$$

dengan $F(t)_{Cr}$ adalah infiltrasi kumulatif empirik (mm) untuk masing-masing macam penggunaan lahan (cr); K_{Cr} adalah pola hubungan antara $F(t)_{empirik}$ dengan ketebalan hujannya ($R(t)$) untuk masing-masing macam penggunaan lahan, yaitu :

$$K_W = -0,0005.(R(t))^2 + 0,045.R(t) + 0,37$$

$$K_A = -0,0005.(R(t))^2 + 0,045.R(t) + 0,40$$

$$K_N = -0,0004.(R(t))^2 + 0,039.R(t) + 0,38$$

$$K_H = -0,0006.(R(t))^2 + 0,050.R(t) + 0,33$$

$$K_P = -0,0004.(R(t))^2 + 0,040.R(t) + 0,42$$

Dengan pola hujan persamaan (18), dan sifat fisik tanah masing masing penggunaan lahan (Tabel 1), serta infiltrasi kumulatif persamaan (24), parameter χ_{Cr} untuk masing-masing penggunaan lahan diformulasikan sebagai :

$$\chi_W = \frac{69.36}{p^{0.091}} e^{\frac{1.99}{t} p^{-0.59}}; \quad \chi_A = \frac{95.93}{p^{0.077}} e^{\frac{0.77}{t} p^{-0.40}};$$

$$\chi_N = \frac{59.48}{p^{0.148}} e^{\frac{2.03}{t} p^{-0.46}}; \quad \chi_H = \frac{61.58}{p^{0.268}} e^{\frac{4.95}{t} p^{-0.75}};$$

$$\chi_P = \frac{57.46}{p^{0.251}} e^{\frac{5.72}{t} p^{-0.66}}$$

Pada setiap probabilitas, semua χ_{Cr} sebagai fungsi dari durasi hujan membentuk garis linier pada grafik semilogaritmik.

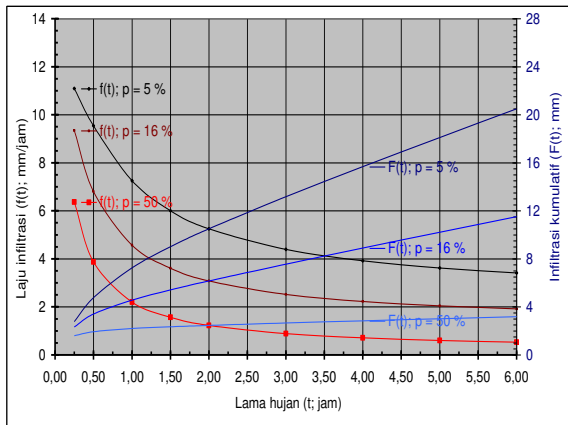
Tipikal Kuantitas Infiltrasi

Berdasarkan persamaan (21) dan (25) laju infiltrasi untuk lima macam penggunaan lahan dapat diprediksi, dengan data masukan durasi dan probabilitas hujan, dan sifat fisik tanah (Tabel 1). Infiltrasi kumulatif ($F(t)_m$) dihitung oleh persamaan (25). Hasil prediksi laju infiltrasi dan infiltrasi kumulatif untuk lima macam penggunaan lahan disajikan pada Gambar 7 sampai dengan Gambar 11.

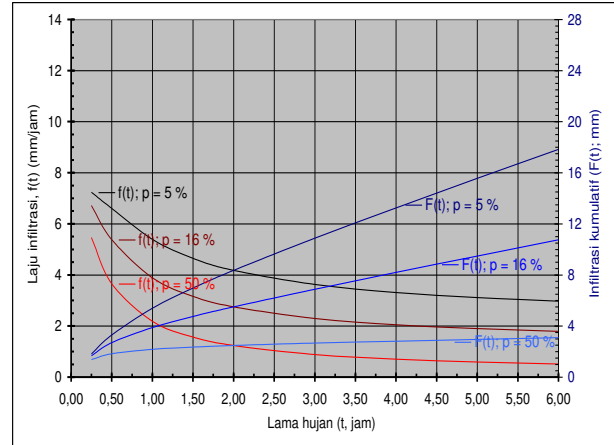
$$F(t)_m = f(t)_{Cr} \cdot t \quad (25)$$

Tabel 1. Sifat-sifat fisik tanah di areal penelitian

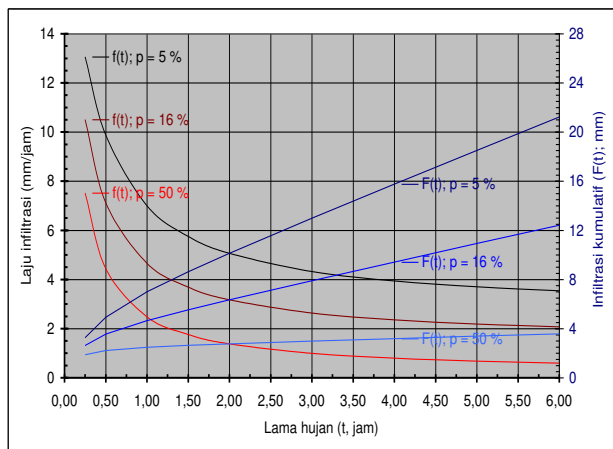
Symbol	Land coverage	θ (%)	η_c (%)	η_l (%)	θ (%)	$\Delta\theta$
W	Second crop (palawija)	60.69	13.40	5.01	42.88	0.1781
A	Agroforestry	60.94	14.52	5.03	41.63	0.1931
N	Non-arable	58.73	11.71	4.89	43.73	0.1500
H	Forest	58.39	11.51	4.96	45.13	0.1326
P	Settlement	58.79	11.07	4.96	45.17	0.1362



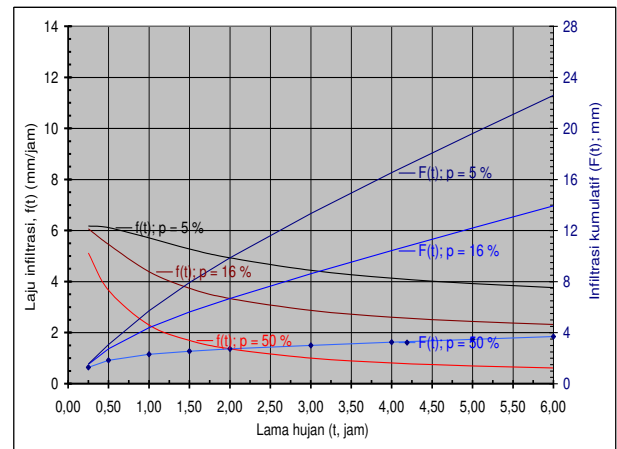
Gambar 7. Laju dan kumulatif infiltrasi pada penggunaan lahan palawija



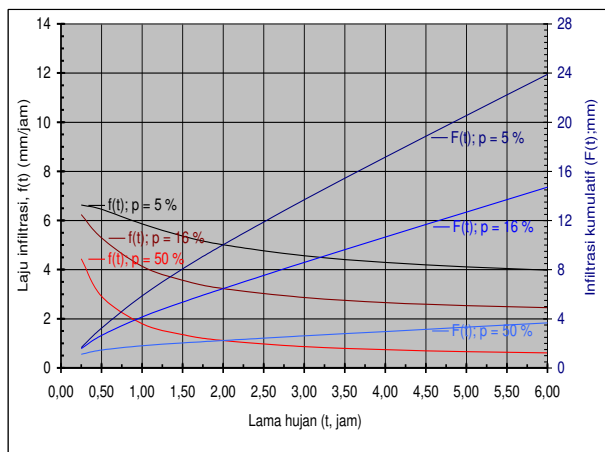
Gambar 10. Laju dan kumulatif infiltrasi pada penggunaan lahan hutan



Gambar 8. Laju dan kumulatif infiltrasi pada penggunaan lahan agroforestri



Gambar 11. Laju dan kumulatif infiltrasi pada penggunaan lahan pemukiman



Gambar 9. Laju dan kumulatif infiltrasi pada penggunaan lahan tidak digarap

Berdasarkan gambar-gambar tersebut (Gambar 7, 8, 9, 10, 11), perubahan laju infiltrasi dibagi dalam tiga tahap : (i) tahap awal; dicirikan oleh penurunan laju infiltrasi yang tajam; (ii) tahap transisi; dicirikan oleh perubahan laju infiltrasi agak landai; dan (iii) tahap akhir; dicirikan oleh penurunan laju infiltrasi yang landai.

Laju infiltrasi pada setiap tahapan mempunyai kuantitas yang berbeda, bergantung atas probabilitas hujan.

Pada p yang sama laju infiltrasi berbanding terbalik dengan lama hujan.

Laju infiltrasi lebih kecil pada waktu hujan (t) yang lebih lama. Beberapa alasan rasional :

- 1) Pada awal hujan kelembaban tanah di sekitar zone perakaran masih di bawah jenuh.
- 2) Pertambahan kelembaban tanah pada zone perakaran menyebabkan berkurangnya nilai *suction head*; dan menurunnya daya tampung tanah terhadap air infiltrasi.
- 3) Penyumbatan pori-pori di permukaan tanah oleh partikel-partikel tanah halus hasil pemecahan

agregat tanah oleh percikan air hujan (erosi percik atau *splash erosion*), juga berperan dalam mengurangi laju infiltrasi.

- 4) Jika zone perakaran jenuh, laju infiltrasi ditentukan oleh laju perkolasi pada zone transmisi. Laju perkolasi sangat ditentukan oleh kondisi kandungan air dan porositas front pembasahan.

Sejalan dengan lajunya, infiltrasi kumulatif ($F(t)_m$) pada t yang sama semakin besar dengan semakin kecilnya probabilitas hujan. Sebaliknya pada p yang sama, infiltrasi kumulatif semakin besar pada durasi hujan yang lama.

Perbandingan Infiltrasi Kumulatif pada Setiap Macam Penggunaan Lahan

Perbandingan dilakukan untuk setaip macam penggunaan lahan menurut probabilitas hujan 50; 16; dan 5% (Gambar. 12; 13; dan 14).

Pada $p = 50\%$ (Gambar. 12), efek genangan permukaan pada lahan permukiman cukup efektif menambah infiltrasi kumulatif setelah hujan 3 jam. Infiltrasi pada lahan ini lebih besar daripada empat penggunaan lahan lainnya.

Pada lahan hutan, sejak awal hujan $F(t)_m$ lebih kecil dari empat macam penggunaan lahan lainnya. Namun ketika $t > 3$ jam, $F(t)_m$ menjadi lebih besar daripada lahan tidak digarap dan palawija, dan pada $t = 6$ jam, $F(t)_m$ hutan relatif sama dengan lahan agroforestri dan permukiman.

Hujan pada lahan permukiman, hampir seluruhnya jatuh dan diterima oleh permukaan tanah, sedangkan hujan $t < 3$ jam pada lahan agroforestri sebagian tertahan oleh tajuk tanaman.

Pada lahan hutan, sampai dengan $R(t)$ tertentu, air hujan tertahan oleh tajuk tanaman. Seluruh air hujan diterima oleh tanah, ketika kapasitas tampung tajuk telah terpenuhi. Kondisi ini dicapai setelah beberapa jam hujan, tergantung ketebalan hujan. Terdapat dua fungsi utama tajuk tanaman dalam memperbesar $F(t)_m$ yaitu :

1. menerima dan menampung sebagian air hujan, sehingga butir hujan tidak langsung jatuh di permukaan tanah.
2. mengendalikan dan mengubah mekanisme penyaluran air hujan sebelum diterima oleh permukaan tanah.

Dengan dua fungsi ini, permukaan tanah menerima air hujan dalam bentuk air hujan yang jatuh dari tajuk tumbuhan dan melalui aliran batang, sehingga suplai air hujan lebih kontinyu dan lebih terkendali.

Pada lahan tidak digarap, $F(t)_m$ pada $t = 0,25 - 0,5$ jam lebih kecil daripada lahan palawija, namun kemudian meningkat hingga. Hal ini menunjukkan bahwa intersepsi hujan oleh semak dan alang-alang, efektif pada $t \leq 0,5$ jam. Semak, alang-alang dan serasah di permukaan lahan tidak digarap cukup efektif membantu proses infiltrasi, walaupun efektivitasnya masih lebih rendah dibandingkan dengan efek genangan di permukaan pada lahan permukiman, dan efek intersepsi pada hutan dan agroforestri.

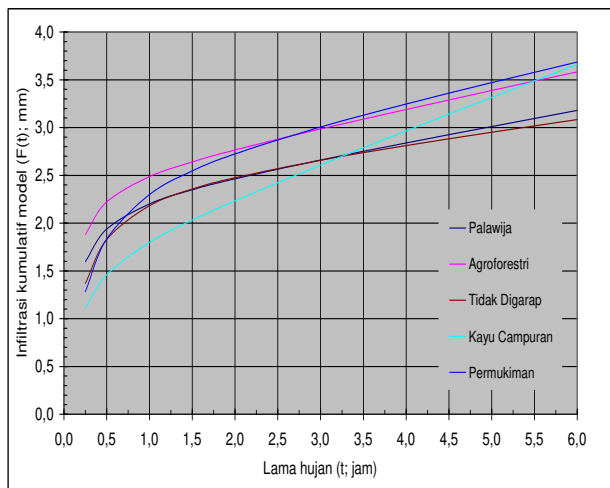
Pada $p = 16\%$ (Gambar. 13), $F(t)_m$ terbesar terdapat pada lahan permukiman dan kayu campuran, yang dicapai pada $t > 1,5$ jam, sedangkan pada $t < 1,5$ jam, $F(t)_m$ terbesar terdapat pada lahan agroforestri. Namun pada $t > 3$ jam, $F(t)_m$ hutan menjadi terbesar.

Pada $R(t)$ yang kecil (saat awal hujan), intersepsi masih cukup efektif untuk menahan air hujan. Namun dengan bertambahnya t dan $R(t)$, kapasitas intersepsi akan terpenuhi secara optimal. Pada kondisi ini, suplai air hujan ke permukaan tanah sama dengan ketebalan hujan, dengan efektivitas yang lebih baik.

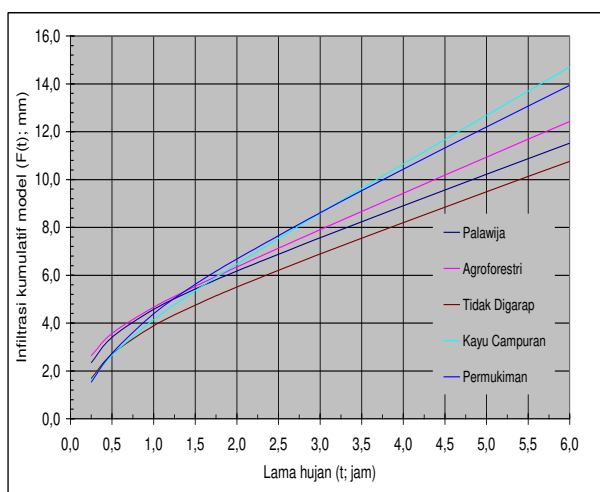
Pada $t < 3$ jam, $F(t)_m$ pada hutan dan lahan permukiman relatif sama, namun pada $t > 3$ jam $F(t)_m$ pada lahan permukiman menjadi lebih kecil. Di lain pihak, Sejas awal hujan, $F(t)_m$ lahan palawija lebih besar dibandingkan dengan lahan tidak digarap. Tanaman semusim dan pengolahan lahan palawija memberikan efek positif pada pertambahan $F(t)_m$.

Pada $p = 5\%$ (Gambar. 14), $F(t)_m$ terbesar ($t > 2$ jam) terdapat pada hutan dan permukiman. Padahal pada $t < 2$ jam, $F(t)_m$ pada kedua lahan ini lebih kecil daripada lahan palawija dan agroforestri. Efek pengendalian air hujan oleh tajuk tanaman pada lahan hutan dan efek genangan permukaan pada lahan permukiman, efektif meningkatkan $F(t)_m$ pada $t > 2$ jam.

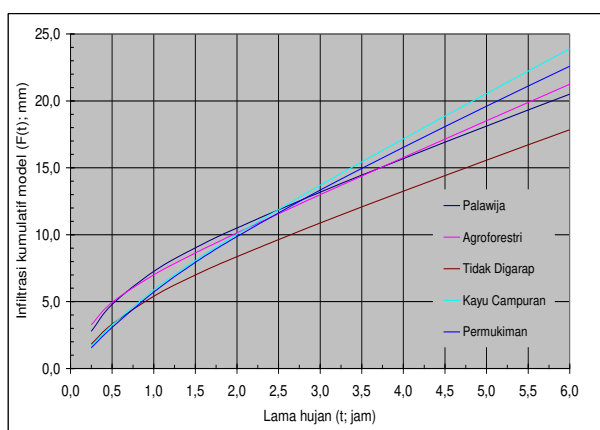
Fenomena ekstrim terdapat lahan tidak digarap. Pada $t < 0,5$ jam, $F(t)_m$ lahan ini sama atau relatif lebih besar daripada lahan hutan dan permukiman. Namun pada $t > 0,5$ jam menjadi yang terkecil. Pertambahan infiltrasi kumulatif akibat pertambahan ketebalan hujan pada lahan ini, tidak setajam empat penggunaan lahan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa semak dan belukar yang menutupi lahan tidak digarap, hanya efektif mengendalikan hujan sampai dengan $t = 0,5$ jam. Selebihnya, infiltrasi kumulatif relatif kecil dan air hujan dialirkan dalam bentuk aliran permukaan.



Gambar 12. Infiltrasi kumulatif pada p= 50%



Gambar 13. Infiltrasi kumulatif pada p=16%



Gambar 14. Infiltrasi kumulatif pada p= 5%

Validitas Kuantitas Infiltrasi

Validitas kuantitas infiltrasi hasil pendugaan ($F(t)_m$) untuk setiap macam penggunaan lahan, diketahui manakala dibandingkan dengan nilai infiltrasi empiriknya ($F(t)_{Cr}$) yang diekspresikan

oleh persamaan (24). Kedekatan antara kedua nilai $F(t)$ tersebut, ditentukan oleh nilai korelasi.

Pada lahan palawija, nilai $F(t)_m$ sangat dekat dengan $F(t)_w$. Angka korelasi $p = 50\%$ sebesar 0,95; $p = 16\%$ 0,98; dan pada $p = 5\%$ 0,99. Simpangan rata-rata sekitar 10,89%; simpangan terbesar terdapat pada $p = 16\%$ yaitu 12,49%; dan pada $p = 5\%$ 11,89%; sedangkan terkecil pada $p = 50\%$ sekitar 8,29%.

Pada lahan Agroforestri, nilai korelasi antara $F(t)_m$ dengan $F(t)_A$ pada $p = 50\%$, 16% , dan 5% , masing-masing 0,96, 0,99; dan 0,99. Rata-rata perbedaan antara $F(t)_m$ dengan $F(t)_A$ sebesar 8,63%. Persentase perbedaan tertinggi, terdapat pada $p = 16\%$ yaitu 9,885%; terendah 7,97% pada $p = 5\%$, dan 8,05 % untuk $p = 50\%$.

Pada lahan tidak digarap, nilai korelasi untuk $p = 50\%$; 16% ; dan 5% , masing-masing 0,90; 0,98; dan 0,99. Perbedaan rata-rata sekitar 10,99%. Perbedaan tertinggi terdapat pada $p = 5\%$, yaitu 12,54%, sedangkan untuk $p = 16\%$ 11,45; dan 8,95% untuk $p = 50\%$.

Pada lahan Hutan, Pada setiap probabilitas, nilai korelasi $F(t)_m$ dengan $F(t)_H$, hampir mendekati sempurna. Nilai korelasi untuk $p = 50\%$; 16% ; dan 5% berturut-turut sebesar 0,98; 0,99; dan 0,99. Simpangan rata-rata sekitar 11,16%. Pada $p = 50\%$, simpangan sekitar 6,94%; $p = 16\%$ dan $p = 5\%$ masing-masing 11,60 dan 14,93%.

Pada lahan Permukiman, nilai korelasi untuk $p = 50\%$ sebesar 0,93; $p = 16\%$ 0,98; dan $p = 5\%$ 0,99. Simpangan rata-rata sekitar 12,30%. Simpangan tertinggi pada $p = 5\%$ yaitu 14,74%, sedangkan terendah pada $p = 50\%$ yaitu 8,82%; dan pada $p = 16\%$ sebesar 13,34%.

SIMPULAN

- 1 Pola intensitas hujan ($I_{t,p}$) di wilayah penelitian diformulasikan sebagai fungsi dari lama hujan (t ; jam) dan probabilitas kejadian hujan (p ;%).

$$I_{t,p} = \left(\frac{9,16 + 6,61.t}{t} \right) e^{-k}$$

dengan $e = 2,718$; dan $k = 0,0375.p$

- 2 Tipikal laju infiltrasi untuk masing-masing macam penggunaan lahan ($f(t)_{Cr}$; mm/jam), diprediksi oleh:

$$f(t)_{Cr} = 10.e^a \left[\frac{\mu}{\chi_{Cr}} + 1 \right]$$

dengan

$$a = -2.391 - 0.0900 + 0,161\eta_c + 0,845\eta_i;$$

$$\mu = (-10^{pF} \cdot \Delta\theta);$$

$$pF = 29,30 - 1,684\theta + 0,371\theta^2 - 0,00029\theta^3;$$

$$\Delta\theta = (\eta - \theta); \text{ dan}$$

χ_{Cr} adalah :

$$\chi_W = \frac{69,36}{p^{0,091}} e^{\frac{1,99}{t} p^{-0,59}}; \chi_A = \frac{95,93}{p^{0,077}} e^{\frac{0,77}{t} p^{-0,40}};$$

$$\chi_N = \frac{59,48}{p^{0,148}} e^{\frac{2,03}{t} p^{-0,46}};$$

$$\chi_H = \frac{61,58}{p^{0,268}} e^{\frac{4,95}{t} p^{-0,75}}; \text{ dan}$$

$$\chi_P = \frac{57,46}{p^{0,251}} e^{\frac{5,72}{t} p^{-0,66}}$$

$f(t)_{Cr}$ merupakan rata-rata selama kurun waktu satu kejadian hujan. Infiltrasi kumulatif diformulasikan sebagai : $F(t)_{Cr} = f(t)_{Cr} \cdot t$.

3. Laju infiltrasi semakin rendah dengan bertambahnya waktu dan probabilitas hujan, sedangkan infiltrasi kumulatif semakin besar dengan bertambahnya waktu hujan dan semakin kecilnya probabilitas hujan.
4. Pada kejadian hujan yang singkat dan kecil di atas lahan bertajuk lebat (hutan), sebagian besar hujan tertahan oleh intersepsi, sehingga infiltrasi kumulatif untuk sangat kecil. Infiltrasi kumulatif pada lahan hutan bertambah secara nyata dengan bertambahnya lama dan ketebalan hujan.
5. Hasil pendugaan infiltrasi, menunjukkan nilai yang cukup akurat dan mendekati nilai infiltrasi kumulatif empirik. Nilai korelasi dan simpangan rata-rata infiltrasi kumulatif pada lahan palawija masing-masing adalah 0,97 dan 10,89%, lahan agroforestri 0,98 dan 8,63%; lahan tidak digarap 0,95 dan 10,99%; lahan kayu campuran 0,99 dan 11,16%; dan permukiman 0,97 dan 12,30%.

DAFTAR PUSTAKA

- Chow, V.T., Maidment, D.R., & Mays, L.W. 1988, Applied hydrology, McGraw-Hill Book Company, New York, St. Louis, etc.; 110-113.
- Darmawidjaja, I. 1990. Klasifikasi tanah, dasar teori bagi peneliti tanah dan pelaksana pertanian di Indonesia, Gadjah Mada University Press. Yogyakarta; 295-319.
- Departement Kehutanan. 1985. dalam Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (1997), Statistik sumber daya lahan/tanah Indonesia, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian; 29.
- Jia, Y. & Tamai, N. 1998. Modeling infiltration into multi-layered soil during an unsteady rain. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 16(2): 1-10.
- Koorevaar, P., Menelik, G. & Dirksen, C. 1983, Elements of soil physics. Depart. Of Soil Science and Plant Nutrition, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: 9 – 10.
- Laat, P., J., M., de. 1987. Agricultural hydrology, International Institute for Hydraulic and environmental Engineering, Delft Netherlands; 39 – 40.
- Miyazaki, T. 1993. dalam Darmawan, I. 1998, Kajian laju infiltrasi berdasarkan jenis batuan dan data sifat fisik tanah (studi kasus: kawasan Bandung Utara dan wilayah Jakarta); Tesis Magister. Bidang Khusus Hidrogeologi, Program Studi Rekayasa Pertambangan, Program Pasca Sarjana-ITB.
- Purwanto, E. 1999. Erosion, sediment delivery and soil conservation in an upland agricultural catchment in West Java, Indonesia; a hydrological approach in a socio-economic context. Academisch Proefschrift, Vrije Universiteit te Amsterdam.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 1997. Statistik sumber daya lahan/tanah Indonesia, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian; 32.
- Rohmat, D. & Indratmo, S. 2004. Pendugaan limpasan hujan pada cekungan kecil melalui pengembangan persamaan infiltrasi kolom tanah (Kasus di cekungan kecil Cikumutuk DAS Cimanuk Hulu); Makalah PIT HATHI XXI, September-Oktober 2004, Denpasar-Bali.
- Soil Survey Staff USDA. 1975. Soil taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. Soil Conserv. Service USDA, Agric. Handbook No. 436.

Appendix – Notasi

- $\Delta\theta$ Pertambahan kelembaban tanah dari kondisi awal hingga sama dengan nilai porositas.
- $f(t)$ Laju infiltrasi akhir
- $F(t)_{Cr}$ Infiltrasi kumulatif empirik tipikal pada lima macam penggunaan lahan
- $F(t)_W$ Infiltrasi kumulatif empirik lahan palawija

$F(t)_A$	Infiltrasi kumulatif empirik lahan agroforestri	η	Porositas total
$F(t)_N$	Infiltrasi kumulatif empirik lahan tidak diagarap	η_c	Pori drainase cepat
$F(t)_H$	Infiltrasi kumulatif empirik lahan hutan	η_l	Pori drainase lambat
$F(t)_P$	Infiltrasi kumulatif empirik lahan permukiman	o_m	Bahan organik
$F(t)_m$	Infiltrasi kumulatif hasil pendugaan untuk lima penggunaan lahan	p	Probabilitas hujan (%)
h	Penjumlahan suction head (Ψ) dan gravity head (z)	pF	<i>Potential free energy</i>
h_1	Head permukaan sama dengan kedalaman genangan (h_o)	ψ	<i>Suction head</i>
h_2	Head tanah yang kering di bawah wetting front	q	Darcy flux
$I_{t,p}$	Pola intensitas hujan sebagai fungsi t dan p (mm/jam)	ρ_b	Berat jenis tanah (<i>bulk density</i>)
K	Pemeabilitas	ρ_p	Kerapatan jenis butir tanah (<i>partikel density</i>)
L	Kedalaman kolom tanah dari permukaan	$R(t)_{t,p}$	Ketebalan hujan sebagai fungsi dari t dan p
		s_c	Coarse sand (pasir kasar)
		s_f	Fine sand (pasir halus)
		s_i	Lanau (silt)
		t	Durasi hujan
		θ	Kandungan air (<i>Volumetric Water Content</i>)
		z	Gravity head